

INFLUÊNCIA DO FENÔMENO EL NIÑO - OSCILAÇÃO SUL (ENOS) EM GELEIRAS TROPICAIS ANDINAS UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA

BIJEESH KOZHIKKODAN VEETIL¹
PEDRO TEIXEIRA VALENTE²
ÉDER LEANDRO BAYER MAIER³
ULISSES FRANZ BREMER⁴
JEFFERSON CARDIA SIMÕES⁵

RESUMO: No presente estudo, investigou-se o papel de um vulcão e uma calota cobertos de gelo nos Andes, mais precisamente as áreas congeladas do Vulcão Cotopaxi (Equador) e o Nevado Cololo (Bolívia), utilizando imagens de satélite de média resolução no período 1984-2011. Em ambos os locais, calculou-se a área e a altitude de linha de neve a partir dos dados de sensoriamento remoto. Buscou-se compreender a influência do El Niño – Oscilação Sul e suas altitudes da linha de neve. Para isso, utilizou-se a Altitude da Linha de Neve como um proxy de alterações de balanço de massa durante o período estudado. Somando, dados de precipitação e temperatura médias mensais de várias estações ao longo da área estudada na forma de conjunto de dados em grade também foram analisados. Finalmente, as variações nos índices El Niño, juntamente com as variações de precipitação e temperatura, foram comparadas às variações de altitude de linha de neve dentro do período analisado. Verificou-se que as áreas glaciais variam conforme um evento de El Niño/La Niña, mas o efeito deste fenômeno é controlado pelas variações dos regimes quentes e frios da Oscilação Decadal do Pacífico. Averiguou-se que o Nevado Cololo oscilou fortemente nas fases frias e quentes de El Niño. Já o vulcão Cotopaxi não demonstrou forte tendência a recuar com as mudanças de fase de El Niño durante o período analisado. Isto indica que os efeitos dos padrões de temperatura de superfície marítima do Pacífico estão mais presentes nos trópicos exteriores do que nos trópicos interiores.

PALAVRAS CHAVE: Andes, Altitude, Linha de Neve, ENOS, clima

ABSTRACT: In the present study, we emphasized on the observational investigation of the snowline altitudes of an ice-covered volcano and an ice cap the Andes. Snowline altitudes and area of the glaciated regions of the Cotopaxi Volcano (Ecuador) and the Nevado Cololo (Bolivia), using satellite images of medium resolution during 1984-2011 were calculated. We tried to understand the influence of the El Niño-Southern Oscillation on the glaciers in the Andes. For this, we used the snowline altitude as a proxy for mass balance changes during this period. Moreover, monthly mean precipitation and temperature data derived from several stations in the form of gridded datasets were also analyzed. Finally, ENSO variability along with changes in precipitation and temperature were compared to variations in snowline altitudes. It is found that

¹ Doutorando em Sensoriamento Remoto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS – Brasil / bijeesh.veetil@ufrgs.br

² Graduando em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS – Brasil / peixeira.valente@gmail.com

³ Professor Doutor pela Universidade Federal de Rio Grande – Rio Grande/RS – Brasil / edermaier@gmail.com

⁴ Professor Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS – Brasil / bremer@ufrgs.br

⁵ Diretor e professor PhD do Centro Polar e Climático do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS – Brasil / jefferson.simoes@ufrgs.br

glaciated areas fluctuated with warm and cold phases ENSO, but the magnitude of this variations is controlled by variations of warm and cold regimes of the Pacific Decadal Oscillation. It was found that Nevado Cololo is fluctuated highly with cold and warm phases of ENSO compared with those in the inner tropics. Cotopaxi volcano showed the same trend but not a strong retreating tendency towards the variations in ENSO during the study period. This indicates that the effects of sea surface temperatures in the Pacific affects the Andean glaciers more in the outer tropics than the inner tropics.

KEY WORDS: Andes, altitude, snowline, ENSO, climate.

1. INTRODUÇÃO

Geleiras, especialmente as geleiras de montanha e calotas de gelo na região tropical, são extremamente sensíveis às flutuações ambientais e consideradas como indicadores úteis da mudança climática (Barry 2006). A resposta das geleiras às mudanças ambientais é complexa (Oerlemans 1989). Foram encontrados recuos das geleiras de montanhas e calotas, os quais foram diretamente ligados com os registros históricos de temperatura (IPCC, 2001). A maioria da população que vive na área circundante das geleiras das montanhas tropicais (onde a precipitação sazonal é quase ausente) depende do derretimento de água da geleira para garantir a sua água fresca diária e suprir as necessidades de energia hidrelétrica. Se estas geleiras desaparecerem para sempre, terá graves consequências na disponibilidade de água para uma grande população. Nas últimas décadas, o nosso conhecimento sobre as oscilações glaciais melhorou significativamente devido à compreensão das modernas relações clima - geleira, bem como devido ao rápido desenvolvimento de tecnologias e conceitos em Paleoclimatologia (Solomina et al. 2008). Cenários de aquecimento global tendem a invocar imagens de elevação do nível do mar, o aumento do derretimento dos corpos das geleiras e a aceleração da perda de gelo das regiões costeiras do mar (Benn e Evans, 1998). Apesar de algumas geleiras do Himalaia terem sido encontradas cobertas de detritos, mostraram um balanço excepcional de massa positiva e avanços (Veetil 2009, 2012). Em outras palavras, as geleiras são bons indicadores para monitorar a mudança climática (Kaser et al. 2003b). As pesquisas vêm mostrando recentemente que as geleiras tropicais nos Andes estão recuando em taxas alarmantes. Esta pesquisa se propõe a investigar tais mudanças no recuo das geleiras no interior e exterior dos Andes tropical. Os principais objetivos desta pesquisa são Calcular as variações nas altitudes da linha de neve (ALN) das geleiras andinas/ calotas de gelo tropical interior e exterior na cordilheira oriental; calcular a correlação entre a ocorrência de El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e a variação nos ALNs das geleiras/calotas de gelo.

2. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, duas calotas de gelo dos Andes tropicais foram consideradas para estudo. Cada uma delas é tomada a partir dos trópicos internos e externos e cada uma destas duas está localizada nas duas cordilheiras - Cordilheira Ocidental e Cordilheira Oriental. Os Andes são a linha divisória entre o Oceano Pacífico e a bacia do Amazonas, com uma orientação norte-sul (Laraque et al. 2007). Devido à localização geográfica, teoricamente as geleiras na Cordilheira

occidental são mais influenciadas pela circulação atmosférica do Pacífico e as da cordilheira oriental pela circulação da Amazônia e Atlântico. Além disso, também há hipótese de que as geleiras nos trópicos exteriores e interiores se comportam em diferentes taxas de ablação, em comparação com aquelas nos trópicos exteriores. As subseções a seguir descrevem a localização geográfica e condições climáticas dos locais de estudo considerados para esta pesquisa.

Local de estudo 1 - trópicos Interior: Equador

No Equador as geleiras estão situadas nos trópicos internos e estão localizadas em duas cordilheiras - Cordilheira Ocidental (Lat: 0°22'N - 1°29'S; Lon: 78°20'W - 78°48'W) e Cordilheira Oriental (Lat: 0°1 ' N. - 2°20 'S; Long: 77°54'W - 78°33'W). No Equador, as geleiras contêm 4% do gelo tropical do mundo inteiro e estão confinados a isolados estratovulcões cobertos de gelo e são uma das principais fontes de água doce para a capital de Quito. Foram encontradas calotas de gelo no Equador e as geleiras sofreram recuo de até 75% no século 20. Cotopaxi, localizado cerca de 60 km a sudeste da capital Quito, é um dos maiores vulcões do mundo e é o segundo pico mais alto do Equador (5897 m a.n.m., 0o40 'S, 78o25'W) (Fig. 1). Este vulcão coberto de gelo amplamente documentado no Equador e suas flutuações no balanço de massa durante os últimos 30 anos, são propostas a serem estudadas. Mt. Cotopaxi está situado na Cordilheira Oriental e é o vulcão ativo mais alto do mundo. A Cordilheira Oriental está diretamente exposta aos ventos úmidos de leste da bacia do Amazonas. Cerca de 19 geleiras irradiam para fora da calota de gelo em todas as direções (Jordan et al. 2005). Entre 1976 e 1997, Cotopaxi havia perdido cerca de 30% de sua área de geleira (Jordan et al. 2005). Erupções mais recentes foram relatadas em 1742-1744, 1768 e 1877 (Jordan et al. 2005).

Local de estudo 2 - trópicos exterior: Bolívia

A Bolívia é considerada como um país tropical, suas principais divisões de altitude consistem em terras baixas (< 800 m de altitude), encostas andinas (800-3200 m de altitude) e planaltos ou Altiplano (> 3.200-6.500 m a.n.m). Na Bolívia, considera-se que as geleiras estão situadas no tropical exterior, que é caracterizada pela variabilidade da temperatura inferior, o influxo de alta radiação solar durante todo o ano e sazonalidade de umidade e precipitação (Rabatel *et al.* 2012).O Nevado Cololo, na Cordilheira Real, é outro local de estudo, utilizado para entender a diferença na resposta das geleiras tropicais para flutuações climáticas nas duas cordilheiras, se houver. Em um ponto de vista glaciológico, as mudanças de ablação são de três tipos (Rabatel *et al.* 2012) – (1) as taxas de fusão mais alta, devido à radiação solar (outubro-dezembro), (2) a taxa de ablação maior devido ao degelo (janeiro-abril) e (3) as taxas de ablação limitadas devido à perda de energia por radiação de onda longa (maio-agosto). Note-se que, se a queda de neve ocorre de maio a agosto, ela pode permanecer durante a estação seca (Rabatel *et al.* 2012), que acrescenta dificuldade em mapear o focinho da geleira usando sensoriamento remoto.

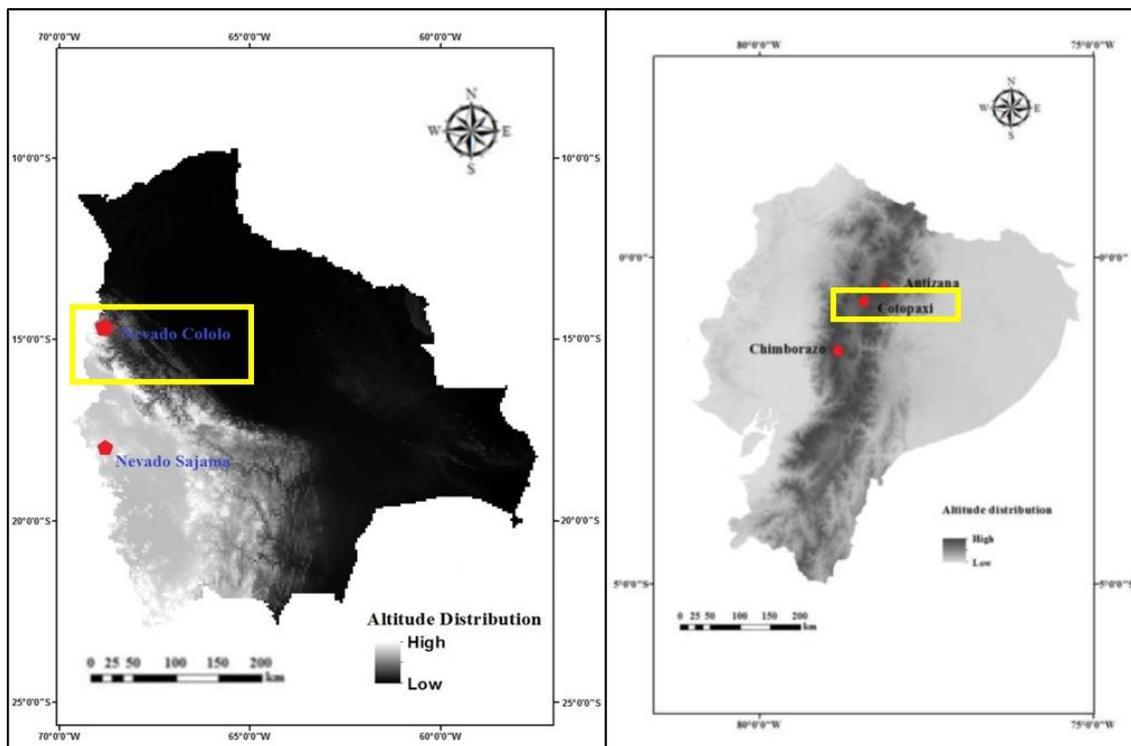


Fig. 1: Localização do Vulcão Cotopaxi e do Nevado Cololo e distribuição e altitude da Bolívia e do Equador, respectivamente.

Toda a pesquisa será realizada em três etapas. Na primeira etapa, será feito o mapeamento multitemporal das geleiras usando imagens de satélite. A altitude da linha de neve (ALN) das geleiras selecionadas nos locais de estudo pode ser calculada, isso depende da disponibilidade das imagens sem nuvens. Na segunda etapa, serão calculadas as anomalias de precipitação e temperatura de 1979-2008 usando os conjuntos de dados. Dependendo da disponibilidade, as alterações no volume de descarga do rio e do nível de água também podem ser analisadas durante esta etapa da pesquisa. Finalmente, será estudada a correlação entre as mudanças nas altitudes da linha de neve (ALN) com as anomalias de precipitação e temperatura bem como com o índice de ENOS.

Mudanças das geleiras de 1979-2013

Para delinear os limites das geleiras e calcular as alterações de balanço de massa devem ser aplicadas etapas de processamento de imagens. As medidas diretas de alterações de balanço de massa nem sempre são práticas. As medições de proxy das mudanças de balanço de massa podem basear-se nas mudanças no ALN no final do verão (que é muito próximo da altitude da linha de equilíbrio - ALE) ou por observação repetida das mudanças de término da geleira. Na área de acumulação, as mudanças no término podem ou não representar uma mudança de balanço de massa e, portanto, não serão consideradas nesta pesquisa. As variações das altitudes da linha de equilíbrio com as flutuações climáticas foram usadas nos Andes e Alpes (Veettil 2013). Com exceção das geleiras cobertas de detritos, ALE separa a acumulação (balanço de

massa positivo), zona de ablação (balanço de massa negativo) e, portanto, é uma boa proxy para o monitoramento de balanço de massa. A mudança de ALE pode ser anual ou decenal e está dentro do escopo desta pesquisa. Nesta pesquisa, verifica-se que o cálculo de ALE utilizando dados visíveis e por infravermelho é extremamente difícil devido à cobertura de neve inconsistente na maioria das imagens. Assim, a altitude da linha de neve (ALN) pode ser usada ou invés de ALE (Arnaud et al. 2001). A maior ALN detectada, usando imagens de satélite durante o inverno austral seco, pode ser utilizada para estimar a altitude da linha de equilíbrio (ALE) do ano (Rabatel *et al.* 2012). Geralmente, para as geleiras de latitude média, a altitude da linha de neve no final do ano hídrico (fim do Verão), podem ser tomadas como a ALE. Quando calculado a partir de medições de proxy, o próprio equilíbrio de massa glacial pode ser utilizado como um substituto do clima. As geleiras usadas para calcular ALN nas áreas de estudo são identificadas nas Fig. 1 assim como os índices de ALN são apresentados na Fig. 2.

Uma vez que um grande número de imagens é utilizado, o delineamento manual é omitido. Landsat TM3/TM5 e TM4/TM5 provaram facilitar o mapeamento das geleiras "limpas" por segmentação de imagens de razão e têm sido utilizadas nesta pesquisa. As imagens de Índice de Diferença Normalizada de Neve (NDSI) também foram utilizadas. A imagem NDSI é calculada a partir dos valores DN de duas faixas de ondas TM como demonstrado na equação 1. Um valor de segmentação adequado foi aplicado para criar uma máscara de geleira (Silverio e Jaquet 2005).

$$\text{NDSI} = [\text{TM2} - \text{TM5}] / [\text{TM2} + \text{TM5}] \quad \text{Eq. 1}$$

Sabe-se que as imagens NDSI são excelentes na discriminação espectral de neve e outras características superficiais, como o solo, rocha, poeira e água e provaram ser adequadas para o mapeamento da cobertura de neve em topografia acidentada (Silverio e Jaquet 2005).

3. RESULTADOS

Por causa da variabilidade interanual da extensão da cobertura de neve, ALN pode ser utilizado como um indicador de clima mais preciso em vez de área de geleira. No Equador, a taxa média de ablação é praticamente constante ao longo do ano em escalas de tempo sazonais. A variabilidade interanual do balanço de massa é controlada por variações anuais da temperatura do ar. Com um estudo com base na ALN de gelo coberto do Vulcão Sajama na Bolívia (Veettil *et al.* 2013) foi possível correlacionar com sucesso as alterações das geleiras com ENOS. Entretanto, a correlação com variação da área não demonstrou resultados aceitáveis. O Índice ODP não foi considerado ao interpretar a influência do ENSO em Veettil *et al.* (2013). A maior ALN detectada usando imagens de satélite no final do verão pode ser tomada como uma proxy da altitude da linha de equilíbrio (ALE) do ano (Rabatel *et al.* 2012). Os resultados dos cálculos na ALN Nevado Cololo estão resumidos na fig. 2. Devido ao problema de sombras, tivemos que omitir alguns dos cálculos de área e, conseqüentemente, os resultados não são dados aqui, devido a descontinuidade temporal. A partir dos valores calculados de ALN durante o período de estudo, além de taxas mais elevadas de precipitação, o Nevado Cololo oscilou, mas a tendência de retirada nesta região é superior. É interessante notar que a resposta de ALN com ODP é mais elevada. Neste caso, que em comparação com aqueles no Equador (Veettil *et al.* 2014), este pode ser, possivelmente, devido a duas possibilidades: 1) Geleiras bolivianas estão sujeitas a maiores oscilações de ALN com variações de TSM em comparação com as geleiras do Equador ou 2). Erros no cálculo de ALN, no caso das geleiras do Equador (Veettil *et al.* 2014) foram interferidos devido à ausência de uma temporada de precipitação fixa. Estas duas possibilidades são

consideradas na seção de discussão. Os leitores são convidados a se referir Veettil *et al* (2014) para as variações de ALN de uma geleira no Equador. Nesta pesquisa, foram considerados dois parâmetros geométricos, Altitude da geleira e de exposição. Enquanto estiver usando técnicas de sensoriamento remoto, é difícil calcular erro no cálculo de ALN e que depende do erro de imagem coregistrada em relação à resolução DEM horizontal e vertical, bem como depende da inclinação do terreno (Arnaud *et al.*, 2001).

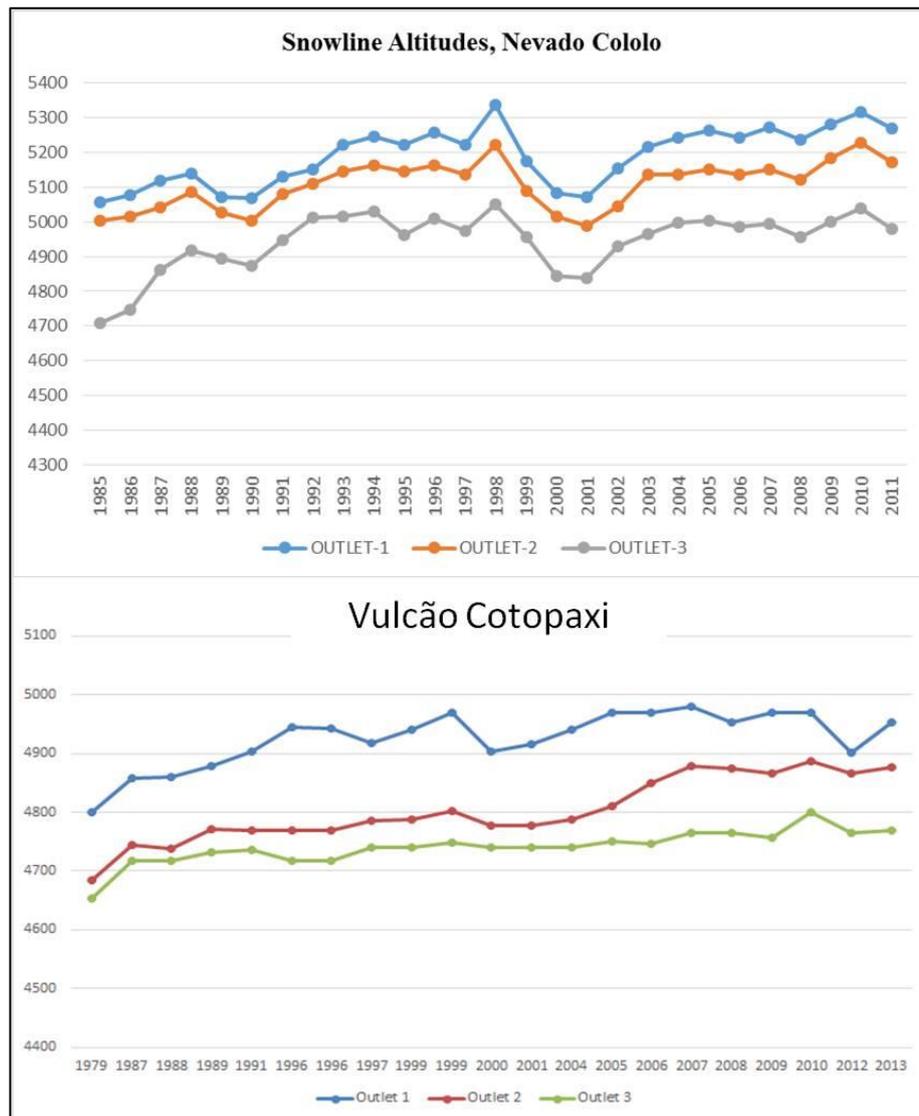


Figura. 2: Altitude da Linha de Neve (ALN) do Nevado Cololo e do Vulcão Cotopaxi.

4. CONCLUSÃO

Comparando as variações dos Índices El Niño e as variações de precipitação e temperatura com as variações de ALN dentro do intervalo de tempo analisado, verificou-se que as áreas glaciais variam conforme um evento de El Niño/La Niña, mas o efeito deste fenômeno é

controlado pelas variações dos regimes quentes e frios da Oscilação Decenal do Pacífico. Averiguou-se que o Nevado Cololo oscilou fortemente nas fases frias e quentes de El Niño. Já o vulcão Cotopaxi não demonstrou forte tendência a recuar com as mudanças de fase de El Niño durante o período. Isto indica que os efeitos dos padrões de temperatura de superfície marítima do Pacífico estão mais presentes nos trópicos exteriores do que nos trópicos interiores.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo de Pesquisas do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, pela bolsa concedida ao primeiro autor. Ao Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal de Rio Grande pelo espaço cedido para a realização deste estudo. A equipe do Centro Polar e Climático pela cooperação.

Referências

ARNAUD Y, MULLER F, VUILLE M, RIBSTEIN P (2001) El Niño - Southern Oscillation (ENSO) influence on a Sajama volcano glacier (Bolivia) from 1963 to 1998 as seen from Landsat data and aerial photography. **Journal of Geophysical Research** 106: 17773-17784.

BARRY RG (2006) **The status of research on glaciers and global glacier recession: a review.** *Progress in Physical geography* 30: 285-306.

BENN DI, EVANS DJA (1998) **Glaciers & Glaciation.** Arnold, London.

IPCC (2001) **Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report.** *In:* Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Nougier, M., Linden, P.J., Xiaosu, D (Eds.) Cambridge University Press, UK

JORDAN W, UNGERRECHTS L, CÁCERES B, PEÑAFIEL A, FRANCOU B (2005) Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. **Hydrological Sciences Journal** 50: 949-961.

KASER G, FOUNTAIN A, JANSSON P (2003b) A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers, International Hydrological Programme - IV. **Technical Documents in Hydrology** No. 59, UNESCO, Paris.

LARAQUE A, RONCHAL J, COCHONNEAU G, POMBOSA R, GUYOT JL (2007) Heterogeneous Distribution of Rainfall and Discharge Regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. **Journal of Hydrometeorology** 8: 1364-1381.

OERLEMANS J (1989) **On the response of valley glaciers to climatic change** *In: Glacier fluctuations and climatic change.* Proceedings of the Symposium on Glacier Fluctuations and Climate Change, Amsterdam, June 1-5, Kluwer Academic Publishers, Netherlands pp 353-371.

RABATEL A, BERMEJO A, LOARTE E, SORUCO A, GOMEZ J, LEONARDINI G, VINCENT C, SICART J.E (2012) Can snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics?. **Journal of Glaciology**, 58: 1027-1036.

SILVERIO W, JAQUET JM (2005) Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. **Remote Sensing of the Environment** 95: 342-350.



“RIESGOS, VULNERABILIDADES Y RESILIENCIA SOCIOAMBIENTAL PARA ENFRENTAR LOS CAMBIOS GLOBALES”

Santiago (Chile), 03 al 05 de Diciembre 2014

Eje 1 – Teorías y metodologías de riesgos, vulnerabilidades y resiliencia ambiental
p. 137 – 144

SOLOMINA O, HAEBERLI W, KULL C, WILES G (2008) **Historical and Holocene glacier-climate variations: General concepts and overview**. *Global and Planetary Change* 60: 1-9.

VEETTIL BK (2009) Use of Landsat TM imagery for mapping debris-covered glaciers in the Karakoram Himalayas, Northern Pakistan. **Dissertation**, University of Dundee, UK.

VEETTIL BK (2012) A Remote sensing approach for monitoring debris-covered glaciers in the high altitude Karakoram Himalayas. **International Journal of Geomatics and Geosciences** 2: 833-841.

VEETTIL BK, MEDEIROS DS, GRONDONA AEB (2013) El Niño – Southern Oscillation (ENSO) influence on the Ice-covered Sajama Volcano, Bolivia, over the last three decades (1984-present). **Brazilian Remote Sensing Symposium (SBSR-2013)** 2013, Foz do Iguacu, Brazil, 13-18 April 8637-8644.

VEETIL BK, MAIER ELB, BREMER UF, SOUZA SF. **Combined influence of PDO and ENSO on northern Andean glaciers: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano**, Ecuador. *Climate Dynamics*. DOI